

Martin STOLÁRIK¹

VÝSLEDKY SEIZMICKÝCH MĚŘENÍ NA TUNELECH IV. ŽELEZNIČNÍHO KORIDORU

RESULTS OF SEISMIC MEASUREMENT IN TUNNELS ON THE RAILWAY CORRIDOR IV

Abstrakt

Na tunelech IV. železničního koridoru bylo realizováno několik unikátních experimentálních měření seizmické odezvy trhací práce. Tyto trhací práce byly prováděny během ražby tunelů v rámci modernizace úseku trati Votice-Benešov u Prahy, ležícím na IV. národním železničním koridoru. Seizmické experimenty byly soustředěny na vibrační efekt v blízké zóně, tzn. první desítky metrů. Senzory byly umístěny na počvě tunelu a na povrchu. Nejbližší senzor byl umístěn ve vzdálenosti 4,5 m od zdroje vibrací. Tento příspěvek prezentuje výsledky experimentálních měření a jejich interpretaci, zejména pak závislost mezi vzdáleností a maximální amplitudou rychlosti kmitání.

Klíčová slova

Tunel, trhací práce, seizmické měření, blízká zóna.

Abstract

In the Railway Corridor IV tunnels were realised several unique experimental measurements of blasting operation seismic response. These blasts were performed during tunnels' driving in frame of the Votice-Benešov u Prahy rail track modernization on the National Railway Corridor IV. seismic experiments were concentrated on vibration effect in near zone, i.e. first tens of meters. Sensors were placed on bottom of tunnel and on the surface. The nearest sensor was located in distance 4.5 m from source of vibrations. This paper presents selected results of experimental measurements and their interpretation, especially relation between distances and maximal velocity amplitudes.

Keywords

Tunnel, blasting operation, seismic measurements, near zone.

1 ÚVOD

Tunely budovaného IV. železničního koridoru jsou součástí transevropské železniční magistrály E55 vymezené na našem území trasou Děčín státní hranice – Praha – České Budějovice – Horní Dvořiště státní hranice. Úsek trati Votice – Benešov u Prahy patří ke IV. Železničnímu koridoru, byl zbudován kolem roku 1870 jako jednokolejný. Mezi Voticemi a Benešovem probíhaly po vzniku Československa práce na zdvoukolejnění tohoto úseku trati, ty však nebyly dokončeny a trať zde zůstala pouze jednokolejná. Na tomto úseku, který je dlouhý 18,3 km, je nyní v rámci stavby Modernizace trati Votice – Benešov u Prahy plánováno zbudování celkem pěti tunelů: hloubený Votický (590 m) a čtyři tunely ražené, a to Olbramovický (480 m), Zahradnický (1044 m), Tomice I (324 m) a Tomice II (252 m). Všechny tunely jsou projektovány jako dvojkolejné s návrhovou rychlostí 150 km/hod., respektive 160 km/hod. Zahradnický tunel je vzhledem ke své délce vybaven i únikovou štolou a šachtou. Výstavba byla zahájena v srpnu 2009, termín dokončení

¹ Ing. Martin Stolárik, Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 321 945, e-mail: martin.stolarik@vsb.cz.

je plánován na prosinec 2013. Celé zájmové území patří do geomorfologické soustavy Jihočeská vysočina, celku Benešovské pahorkatiny. Území se nachází při jihovýchodním okraji středočeského plutonu, v blízkosti výběžku moldanubika, a je budováno zejména paleozoickými vyvřelinami, hlubinnými a žilnými. Horniny jsou zde obecně velmi variabilní a jsou charakteristické značnou petrografickou pestrostí. Převažujícími horninovými typy jsou v daném zájmovém území drobnozrnné žilné granity a aplity, v části území pak také porfyrické, středně zrnité, amfibol-biotitické žuly a porfyrické, středně zrnité biotitické žuly s amfibolitem sedlčanského typu. Lokálně se zde vyskytují kontaktní metamorfity zastoupené cordieritickými rulami a migmatity. Rozpukání hornin je značné, převažuje zde velmi velká až velká hustota diskontinuit, pouze výjimečně byla zjištěna střední hustota diskontinuit. Pukliny jsou zpravidla všesměrné, neprůběžné a sevřené, případně vyhojené žilným křemenem. V okolí tektonických linií a poruchových zón jsou horniny intenzivně alterované a zpravidla podrcené. Kvartérní pokryv je zastoupen deluviálními a fluviálními sedimenty, jejichž mocnost se pohybuje od 0,5 do 10 m. Z hydrogeologického hlediska jsou granitické horniny jako celek poměrně málo propustné a disponují jen omezenou puklinovou propustností. Dotace vody do zvodně je zajišťována výhradně infiltrací atmosférických srážek v hydrogeologickém povodí, k odvodnění dochází v morfologických depresích do místních vodotečí. [1, 2]

Experimentální seizmická měření byla prováděna na tunelech Olbramovice, Tomice I a Tomice II. Tyto železniční tunely jsou budovány Novou rakouskou tunelovací metodou, jejíž součástí je také rozpojování hornin za pomoci trhacích prací.

Všechna měření byla prováděna seizmickými aparaturami Gaia2T se senzory ViGeo2 (obojí vyrábí firma Vistec Praha). Aparatura Gaia2T je tříkanálová seizmická stanice s možností spouštěného i kontinuálního záznamu digitálních dat. Výhodou těchto senzorů je frekvenční rozsah do vyšších frekvencí, tj. od vlastní frekvence 2 Hz až do 200 Hz, a jejich větší hmotnost, což umožňuje stabilnější usazení. Horizontální osy senzorů byly orientovány podél a napříč vedení tunelu, třetí osa byla svislá. Záznamové parametry byly pro tato měření nastaveny na maximální vzorkovací frekvenci - 500 Hz/kanál.

Pro zpracování celého souboru dat byla zvolena metodika, při níž jsou odečteny maximální hodnoty amplitud rychlosti kmitání na jednotlivých složkách (vertikální, horizontální radiální a horizontální transversální) a následně je dopočítána složka prostorová podle vztahu:

$$v = (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)^{0,5} \quad (1)$$

Z této hodnoty jsou následně počítány koeficienty útlumu „K“ a sestavovány příslušné závislosti. Ke grafickému zobrazení byl použit obecně známý Langeforsův vztah [např. 3, 4, 5, 6, 7].

Nedílnou součástí interpretace naměřených dat je i studium záznamů vlnových obrazů ve frekvenční oblasti za pomoci Fourierovy transformace (FFT spektra).

Díličí výsledky jsou prezentovány také v příspěvku Examples of law of seismic wave attenuation autorského kolektivu Kaláb, Pandula, Stolárik, Kondela, odeslaném do časopisu Tunnelling and Underground Space Technology.

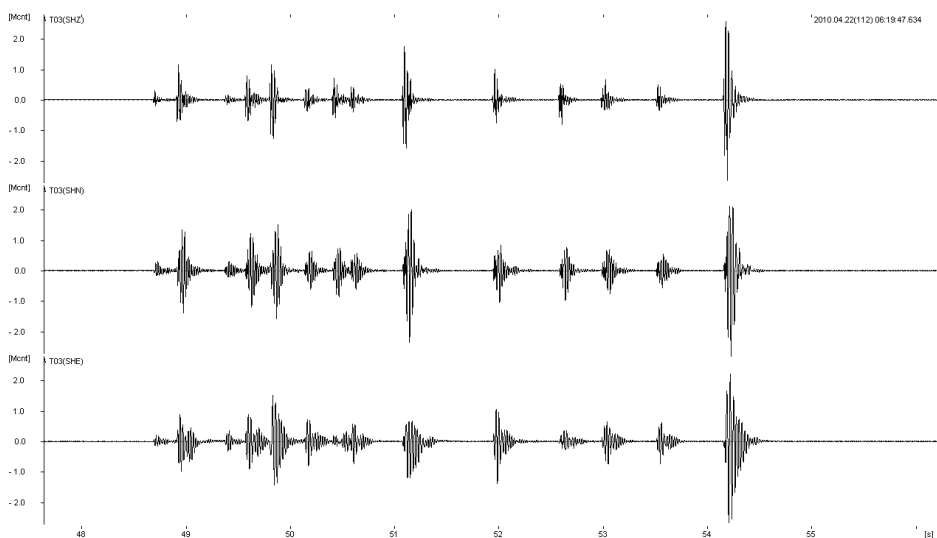
2 EXPERIMENTÁLNÍ SEIZMICKÉ MĚŘENÍ NA TUNELU OLBRAMOVICE

Experimentální seizmické měření bylo prováděno při trhacích pracích prováděných na jádře mezi staničením 220,0 a 245,0 se senzory nejdále na staničení 265,0. Na horní lávce raženého tunelu bylo realizováno celkem 12 měření ve vzdálenosti 6,5 m až 35 m od čelby (resp. 4,5 m až 33 m od paty vývrtů). Ve všech případech se jednalo o trhací práce s celkovou náloží do 25 kg a s mezní náloží na jeden časový stupeň 3 kg. Vývrty byly vrtány ve směru osy díla a záběr byl 2 m.

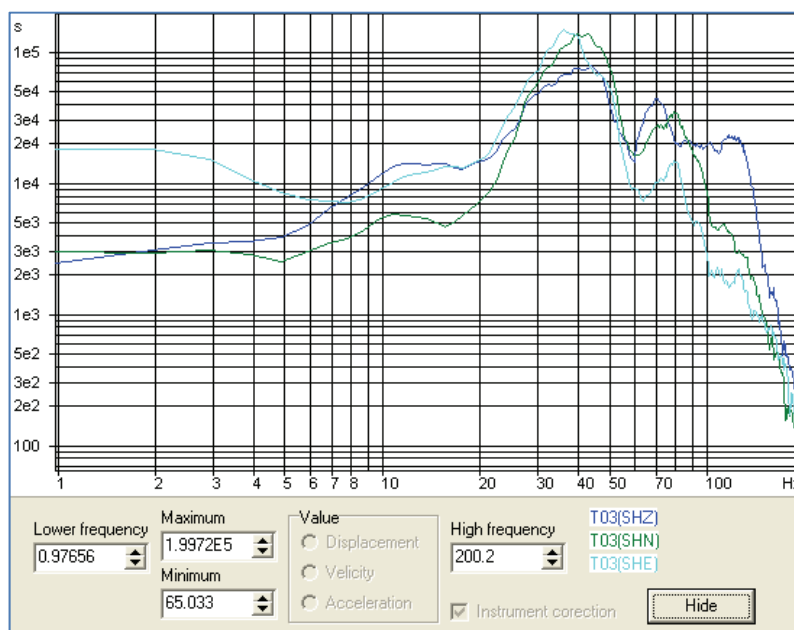
Příklad záznamu vlnového obrazu naměřeného v tunelu je uveden na obrázku 1. Na tomto obrázku je shora dolů zobrazena složka vertikální /Z/, dále složka horizontální radiální /N/ a transversální /E/, vodorovná osa je čas v sekundách (osy jsou ve stejném amplitudovém i časovém měřítku). Zpracovatelský SW neumožňuje přepočtení hodnot amplitud kmitání na fyzikální jednotky [mm.s⁻¹], proto jsou v obrázcích svislé osy vyneseny v kvantovacích úrovních [Mcnt]. Na záznamu

je na všech třech osách zřetelně vidět časování trhací práce do jednotlivých časových stupňů, vyvolané vibrace jsou po odstřelech jednotlivých stupňů téměř utlumeny a nedochází tudíž ke sčítání seizmického efektu po sobě jdoucích časových stupňů. Délka celého záznamu odpovídá časovému rozsahu prováděné trhací práce a je cca 5 s.

Příklad frekvenčního spektra k danému záznamu je na následujícím obrázku 2. Převládající frekvence v záznamech se ve všech spektrech nacházejí v rozmezí 30 – 50 Hz. Ve spektrech lze identifikovat široké výrazné píky s uvedeným rozsahem. Zvláště na záznamu svislé složky lze pozorovat také méně výrazné píky na vyšších frekvencích, tj. 60 – 70 Hz.



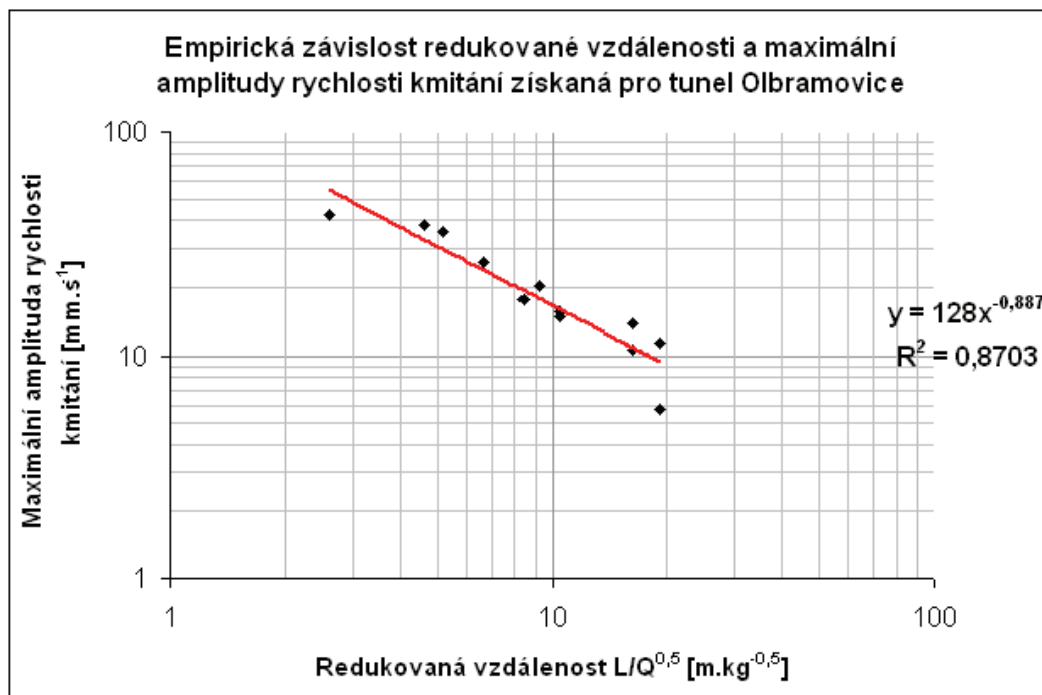
Obr. 1: Příklad vlnového obrazu záznamu trhací práce na tunelu Olbramovice



Obr. 2: Příklad frekvenčního spektra záznamu trhací práce na tunelu Olbramovice

Získané záznamy z jednotlivých odstřelů jsou si navzájem velmi podobné, a to v časové i spektrální oblasti. To vede k závěru, že data z realizovaného měření je možno použít k zobrazení Langeforsova empirického vztahu do grafické závislosti. Výrazné změny v zaznamenaných datech by zřejmě ukazovaly na významné změny v lokální geologii či registraci různých typů vln.

Získaná závislost hodnot maximálních prostorových složek kmitání na redukované vzdálenosti je představena v grafu 1. Zde je vidět, že závislost je v tomto zobrazení velmi těsná (koeficient korelace R^2 pro zobrazená data je 0,87). Tato skutečnost je zřejmě důsledek monotónní geologické stavby (z pohledu šíření seizmických vln masivem) v místě měření. Výjimečnost tohoto získaného vztahu je v tom, že křivka začíná již na hodnotě redukované vzdálenosti $2,6 \text{ m.kg}^{-0,5}$ (to umožnilo měření seizmických účinků ve velmi malé vzdálenosti od „těžiště trhací práce“).

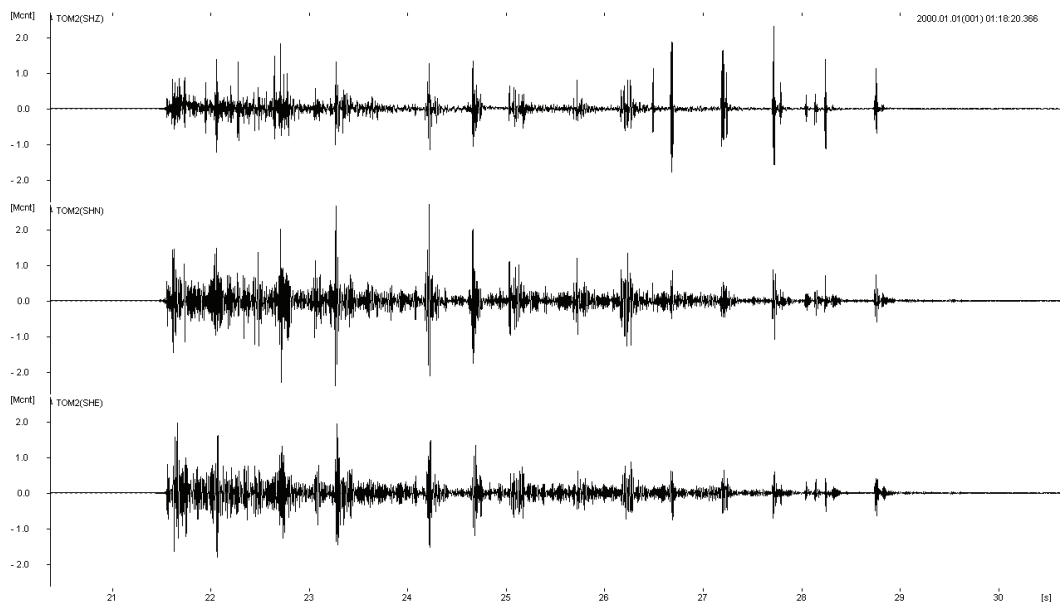


Graf 1: Empirická závislost redukované vzdálenosti a maximální amplitudy rychlosti kmitání získaná pro tunel Olbramovice

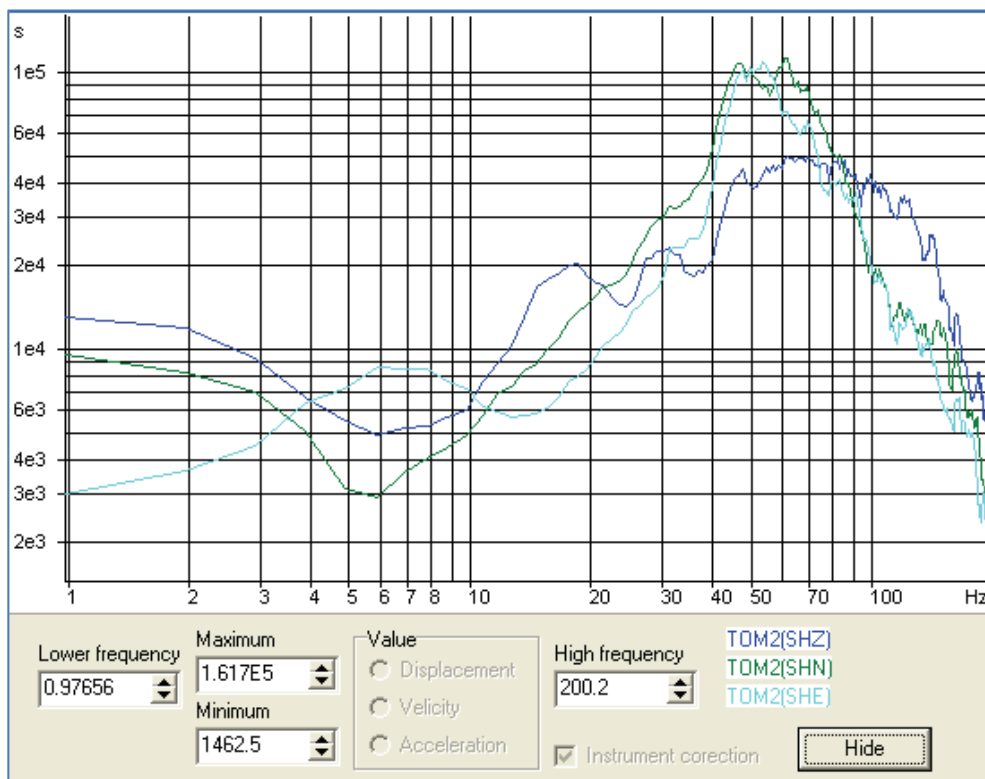
3 EXPERIMENTÁLNÍ SEIZMICKÉ MĚŘENÍ NA TUNELU TOMICE I

Experimentální seizmické měření bylo prováděno při trhacích pracích prováděných na kalotě mezi staničením 215,0 a 225,0. Na počtvě raženého tunelu bylo realizováno celkem 12 měření ve vzdálenosti 20 m až 55 m od čelby. Ve všech případech se jednalo o trhací práce s celkovou náloží 72 kg a s mezní náloží na jeden časový stupeň 7,2 kg. Vývrty byly vrtány ve směru osy díla a záběr byl 3 m.

Příklad záznamu vlnového obrazu naměřeného v tunelu je uveden na obrázku 3. Délka celého záznamu odpovídá časovému rozsahu prováděné trhací práce a je cca 8 s. Příklad frekvenčního spektra k danému záznamu je na následujícím obrázku 4. Převládající frekvence v záznamech se ve spektrech horizontálních složek nacházejí v rozmezí 45 – 70 Hz. Ve spektru složky vertikální 45 – 120 Hz.

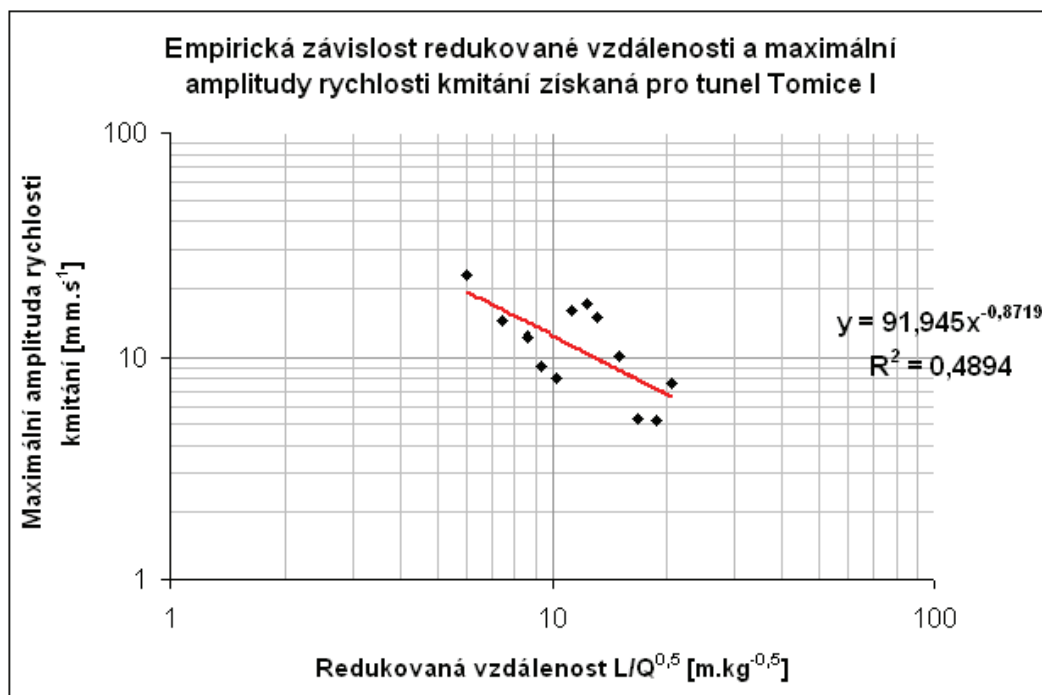


Obr. 3: Příklad vlnového obrazu záznamu trhací práce na tunelu Tomice I



Obr. 4: Příklad frekvenčního spektra záznamu trhací práce na tunelu Tomice I

Data z realizovaného měření byla opět použita k zobrazení Langeforsova empirického vztahu do grafické závislosti. Získaná závislost hodnot maximálních prostorových složek kmitání na redukované vzdálenosti je představena v grafu 2. Koeficient korelace R^2 pro zobrazená data je 0,49.

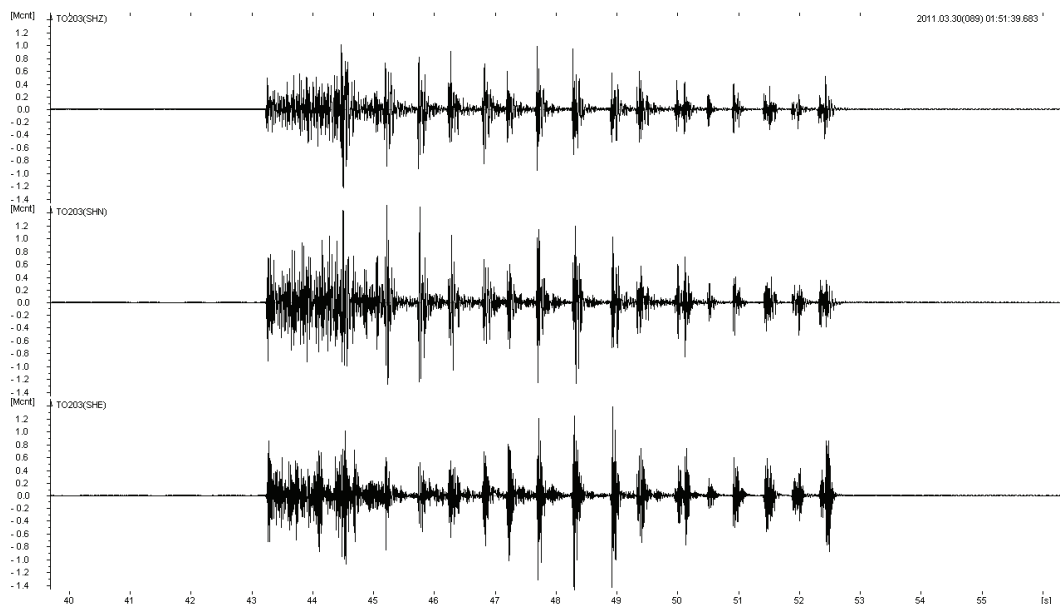


Graf 2: Empirická závislost redukované vzdálenosti a maximální amplitudy rychlosti kmitání získaná pro tunel Tomice I

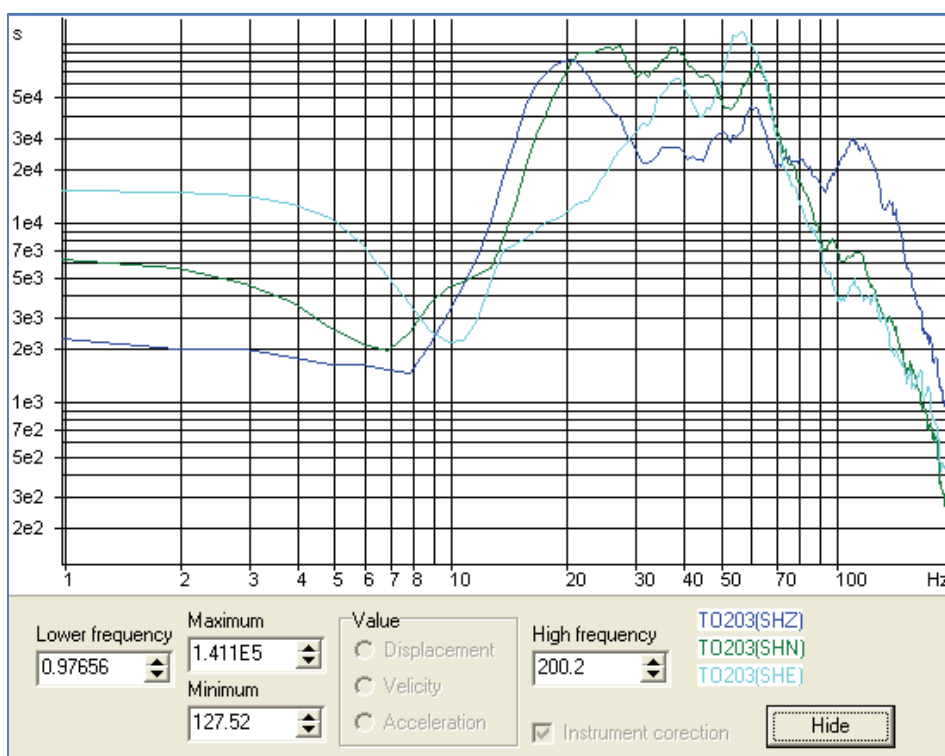
4 EXPERIMENTÁLNÍ SEIZMICKÉ MĚŘENÍ NA TUNELU TOMICE II

Experimentální seizmické měření bylo uskutečněno při trhacích pracích prováděných na kalotě mezi staničením 168,2 a 175,7. Na povrchu nad tunelovou rourou (nadloží cca 7 m) bylo realizováno celkem 27 měření ve vzdálenosti 13,5 m až 50 m od čelby. Ve všech případech se jednalo o trhací práce s celkovou náloží 82 kg a s mezní náloží na jeden časový stupeň 4,8 kg. Vývrty byly vrtány ve směru osy díla a záběr byl 1,5 m.

Příklad záznamu vlnového obrazu naměřeného na povrchu je uveden na obrázku 5. Délka celého záznamu odpovídá časovému rozsahu prováděné trhací práce a je cca 10 s. Příklad frekvenčního spektra k danému záznamu je na obrázku 6. Výrazný pík ve spektru svislé složky je na frekvenci 20 Hz, méně výrazný pak na frekvencích 60 a 110 Hz. Převládající frekvence ve spektru horizontální složky radiální je v rozsahu 20 – 60 Hz a ve spektru složky horizontální transversální v rozsahu 40 – 70 Hz.

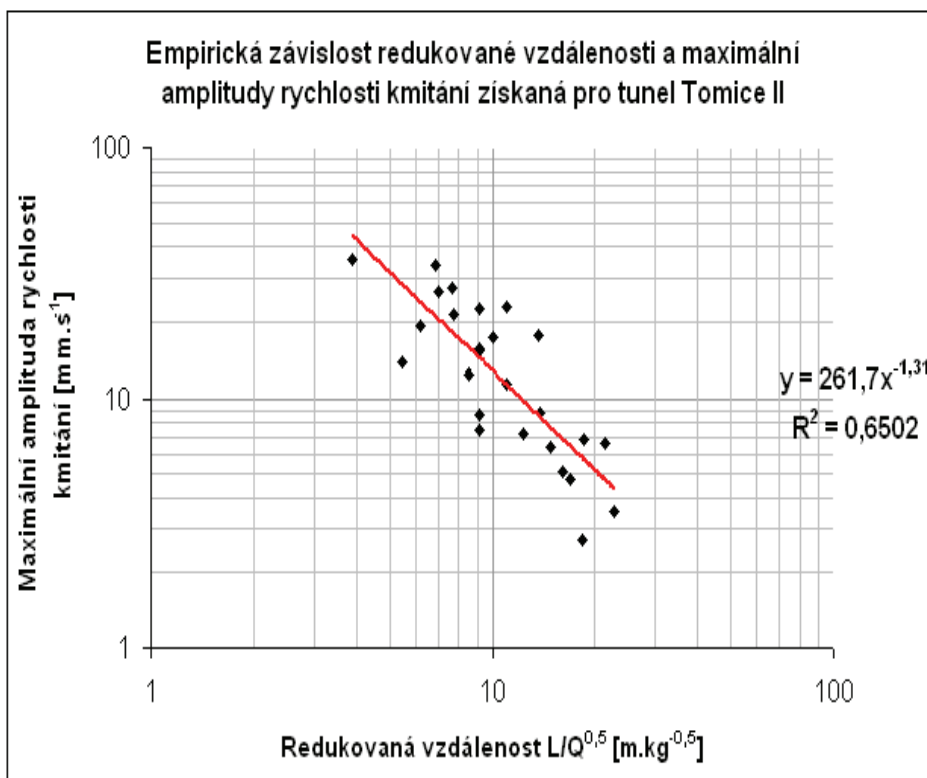


Obr. 5: Příklad vlnového obrazu záznamu trhačí práce na tunelu Tomice II



Obr. 6: Příklad frekvenčního spektra záznamu trhačí práce na tunelu Tomice II

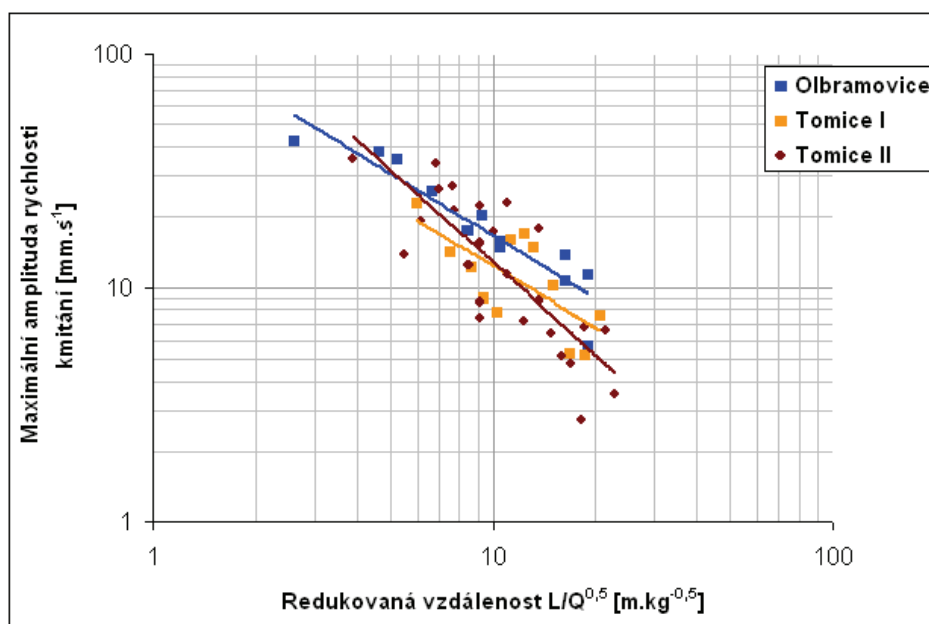
Stejně jako u předchozích dvou případů z podzemí, byla i zde data opět použita k zobrazení Langeforsova empirického vztahu do grafické závislosti. Získaná závislost je představena v grafu 3. Koeficient korelace R^2 pro zobrazená data je 0,65.



Graf 3: Empirická závislost redukované vzdálenosti a maximální amplitudy rychlosti kmitání získaná pro tunel Tomice II

5 ZÁVĚR

V příspěvku byly představeny výsledky seizmických měření ze tří tunelů budovaných na území České republiky Novou rakouskou tunelovací metodou. Ve dvou případech se jednalo o experimentální měření odezvy trhací práce v blízké zóně přímo v raženém tunelu na počvě. V třetím případě pak na povrchu nad raženým tunelem. Získaná data z měření byla použita k vykreslení Langeforsova empirického vztahu do grafické závislosti (graf 4) a ke spočítání konstant přenosu K daných tímto vztahem.



Graf 4: Empirické závislosti redukované vzdálenosti a maximální amplitudy rychlosti kmitání získaná pro tři sledované tunely

Pro tunel Olbramovice byla závislost těsná s koeficientem korelace $R^2 = 0,87$. U tunelů Tomice I a Tomice II jsem získali poněkud volnější závislost s koeficienty korelace $R^2 = 0,49$ resp. $R^2 = 0,65$.

Z předchozího vztahu byly definovány dvě hodnoty konstant přenosu K a to pro nejmenší ($K1$) a největší ($K2$) redukovanou vzdálenost (danou vzdáleností od zdroje vibrací L a mezní náloží Q) při maximální amplitudě rychlosti kmitání v dané redukované vzdálenosti (tab. 1).

	Olbramovice		Tomice I		Tomice II	
	<u>K1</u>	<u>K2</u>	<u>K1</u>	<u>K2</u>	<u>K1</u>	<u>K2</u>
	109,92	216,06	137,69	157,03	137,91	80,06
v_{\max} [mm.s ⁻¹]	42,31	11,34	23,09	7,66	35,55	3,51
L [m]	4,5	33	16	55	8,5	50
Q [kg]	3		7,2		4,8	

Tab. 1: Přehled krajních hodnot konstanty přenosu K pro sledované tunely

PODĚKOVÁNÍ

Príspevek bol realizovaný za podpory projektu: „*Tvorba a internacionalizace špičkových vědeckých týmů a zvyšování jejich excelence na Fakultě stavební VŠB-TUO*“.

Experimentální měření byla realizována v rámci projektu GAČR 105/09/1415 „*Studium seizmických projevů trhacích prací a dalších vibrací v blízké zóně vyvolaných při ražbě mělkých podzemních děl*“.

LITERATURA

- [1] GRAMBLIČKA, M., MÁRA, J., MAŘÍK, L. Nové železniční tunely na traťovém úseku Votice-Benešov. *Tunel*. 2008, roč. 17., č. 1, s. 41-47. Praha.
- [2] ŠPONAR, R. a KOSSLER, M. Ražba tunelů na dopravní stavbě Modernizace trati Votice-Benešov u Prahy. *Tunel*. 2010, roč. 19., č. 3, s. 14-21. Praha.
- [3] KALÁB, Z., STOLÁRIK, M.: *Analýza koeficientu K v rovnici pro odhad maximální amplitudy rychlosti kmitání vyvolané trhací prací*, Proceedings of the 4th International Conference on the Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering, 253-258, Žilina, 2008.
- [4] PANDULA, B., KONDELA, J., MIHÁLIK, J., KAMENSKÁ, K. Zákon útlmu seizmických vln pri trhacích prácach, *Trhacia technika 2010 – zborník prednášok*, 2010, Slovenská spoločnosť pre trhacie a vŕtacie práce, s. 193-202, Banská Bystrica.
- [5] PANDULA, B. a KONDELA, J. *Methodológia seizmiky trhacích prác*, Slovenská spoločnosť pre trhacie a vŕtacie práce – ZSVTS, 2010, 156 s., Banská Bystrica.
- [6] DOJČÁR, O., HORKÝ, J., KOŘÍNEK, R. *Trhacia technika*, MONTANEX, a.s., 1996, 421 s., Ostrava.
- [7] OZER, U. Environmental impacts of ground vibration induced by blasting at different rock units on the Kadikoy–Kartal metro tunnel, *Engineering Geology*. 2008, č. 100, s. 82-90, Amsterdam.

Oponentní posudek vypracoval:

Doc. Dr. Ing. Jan Pruška, Katedra geotechniky, Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze.

Doc. RNDr. Blažej Pandula, Ph.D., Ústav geovied, Fakulta BERG, Technická univerzita v Košiciach.